

열병합 / 산업용 보일러 화로에서의 연소 해석

김병윤 · 박부민 · 이경모*

Modeling of Combustion in Co-Generation / Industrial Boiler Furnace

Kim Byoung-Yun, Park Pu-Min and Lee Kyoung-Mo

Key Words : FEGT(화로출구가스온도), Boiler(보일러), Furnace(화로), Combustion(연소), NOx(질소산화물), CFD(전산유체역학)

Abstract

Our company produces boilers for industrial usages or power plants. The aim of this study is to investigate the flame structure, heat transfer to evaporator tube wall and NOx emission in the furnaces. Also we are to derive correct FEGT(Furnace Exit Gas Temperature) characteristic curve. When we design furnace and superheater, economizer etc. FEGT characteristic curve is very important factor for optimum design. We calculated turbulent reacting flow, heat transfer and NOx emission in furnace by using numerical modeling with the help of commercial code. Three dimensional steady state calculation is done. k-e turbulence model and equilibrium chemistry combustion model with β -probability density function is used. To calculate radiation heat transfer discrete ordinates model is used. And we measured FEGT at several operating plants. Measurement is done by R-type thermocouple. Radiation shield is attached to the thermocouple to prevent radiation effect. Measured and calculated results show good agreement. And we could understand the flame structure and NOx formation positions in each furnaces.

1. 서론

현대중공업은 공정용 증기나 열병합 발전용 증기를 만들기 위한 대형 보일러를 생산하고 있다. 이들 보일러에는 여러 개의 버너가 장착되며, Windbox 를 통해 공급되는 연소용 공기는 이 버너들을 지나면서 강한 선회 속도를 갖게 된다. 분무된 액체 연료(중유)와 공기는 화로에서 연소하게 되며, 이 화염으로부터 복사와 대류 열전달을 통해 벽을 둘러싼 증발기에서 포화증기가 만들어진다. 화로를 빠져나간 배기가스는 과열기, 절탄기(economizer), 공기에열기, 전기집진기를 차례로 지나 보일러를 빠져 나간다. 그림 1.에 HS 와 HT 모델 보일러의 형상을 나타내었다.

현대중공업에서는 최근 강화되고 있는 배기가스 환경규제를 만족시키고 보다 효율이 높은 보일러

개발을 위해 전산유체 해석, 축소모델 실험, 실 플랜트 측정 등의 방법으로 windbox, 저 NOx 버너, 화로에 대한 연구를 진행하고 있다. 본 연구는 열병합/산업용 보일러 성능 향상 과제의 일환으로 화로에서 화염의 구조, 벽면으로의 열전달, NOx 생성 특성을 밝히고 FEGT(Furnace Exit Gas Temperature) 특성곡선을 도출하기 위한 것이다.

FEGT 특성곡선은 부하에 따른 FEGT 의 변화를 나타내는 그래프인데 보일러를 설계할 때 이것을 이용하여 증발기, 과열기, 절탄기, 공기에열기의 규모를 결정한다. 따라서 보다 효율적인 보일러를 설계하기 위해서는 정확한 FEGT 의 예측이 매우 중요하다.

본 연구에서는 전산유체를 사용하여 화염의 특성을 파악하고 FEGT 특성곡선을 도출하였으며 실제 운전되고 있는 플랜트에서의 FEGT 측정을 통해 계산 결과를 검증하였다.

* 현대중공업

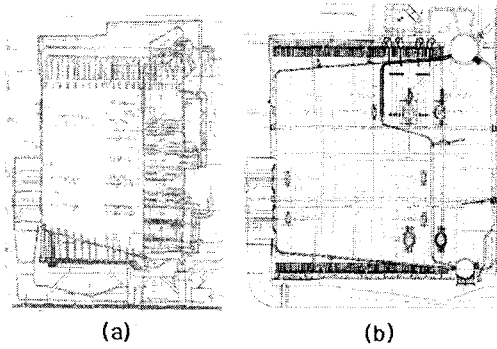


그림 1. 보일러의 형상 (a) HS type (b) HT type

2. 보일러의 특징과 기하학적 모델링

2.1 보일러의 특징

본 연구의 대상인 보일러는 현대중공업의 HS-type 과 HT-type 모델이다. 증기 생산량은 150-260ton/hr 범위이며 증기의 압력과 온도는 40-130 kg/cm²g, 400-550°C 범위에서 운전된다. 연료는 중유(bunker-C)나 저유황왁스유(LSWR : Low Sulfur Wax Residual)를 사용한다. 260ton/hr 보일러의 경우 화로의 크기는 높이 18m, 폭 6.5m, 길이 7.6m 정도이다.

보일러의 용량에 따라 4-6 개가 장착되는 버너는 증기를 이용한 분무 방식을 사용하는 현대중공업의 저 NO_x 버너 모델인 LNH 버너이다. LNH 버너는 그림 2에 나타난 것처럼 연소용 공기를 3단으로 나누어 공급하며 각 단의 유량을 조절할 수 있도록 되어 있다. 버너 출구에서 연료가 과농한(fuel-rich) 상태에서 연소 되도록 하고 미연분은 그 후류 쪽에서 연료가 희박한(fuel-lean) 상태에서 완전연소 되도록 하는 다단연소 방식이다. 이와 같은 연소 방식을 통해 화염의 온도를 낮추어 thermal NO_x 를 줄이는 동시에 연료 속의 질소와 반응할 산소를 줄여 fuel NO_x 의 저감을 꾀하였다.

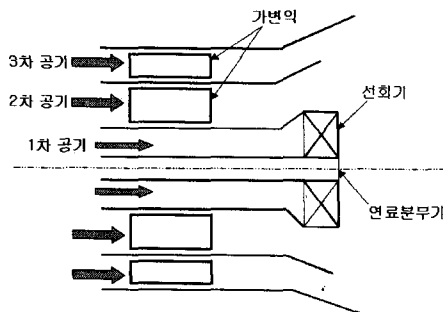


그림 2. LNH 버너 개략도

1 단 유로에는 선회기가 설치되어 있으며 2,3 단 유로에는 가변익(vane)을 설치하여 선회량을 조절할 수 있도록 하였다.

화로와 과열기 사이에는 이들을 분리하는 수관으로 된 스크린이 있다. 화로의 벽은 물과 증기가 통과하면서 포화증기를 만드는 수관이 멤브레인 구조를 이루며 화로를 둘러싸고 있다.

2.2 기하학적 모델링

화로는 폭 방향으로 2 열의 버너가 배치되어 기하학적으로 좌우 대칭을 이루며 각 열의 버너는 반대 방향의 선회속도를 가지므로 대칭면(symmetry) 조건을 사용하여 반쪽만 모델링하였다. 수관으로 둘러싸여 요철이 있는 벽면은 매끈한 평면으로 가정하였다.

버너의 연료분무기와, 선회기, 가변익은 모델링하지 않고 기본적인 유로 형상만을 모델링하였다. 계산격자는 Gambit 을 사용하여 육면체 격자로 만들었다. 그림 3에 260ton/hr 보일러의 단순화 된 화로의 형상과 버너 부분의 계산격자를 나타내었다.

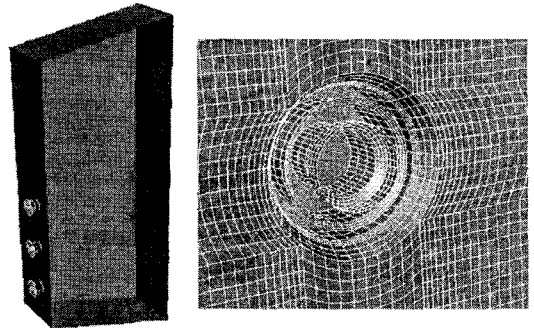


그림 3. 화로의 형상과 버너 부분의 격자

3. 수치해석 방법과 경계조건

화로내부의 유동은 버너를 지나면서 강한 선회 성분을 갖는 복잡한 난류 유동이다. 공기의 유동과 연료 액적 사이에 운동량 교환이 일어나고 열전달을 통한 액적의 증발이 일어난다. 증발된 연료 증기는 공기와 반응하여 연소가 일어나고 화로의 벽과 대류와 복사를 통한 열교환이 일어난다.

이와 같은 현상들을 계산하기 위해 연속방정식과 운동량 방정식, 에너지 방정식, 난류전달 방정식을 유한체적법을 사용하여 풀었다. 난류모델은 표준 k-e 모델을 사용했으며 벽면의 난류경계층에서의 유동 및 열전달은 표준벽면함수를 사용하였다. 액적의 운동궤적과 열전달을 풀기 위해서는

Lagrangian 방법을 사용하는 discrete phase 모델을 사용하여 운동량과 열교환을 계산하였다.

화학종의 생성과 소멸에 대한 화학반응과 이들 화학종의 보존 방정식을 풀고 반응열을 계산하여 에너지 방정식에 포함시켰다. 연소계산을 위해 화학평형 모델을 사용하여 mean mixture fraction 과 mixture fraction variance 의 보존방정식을 계산하였으며 난류의 영향은 β -확률밀도함수를 사용하여 나타내었다. 계산에 사용된 화학종은 C, H, N, O, CO₂, H₂O, N₂, O₂, CH₄, C₂H₄, CO, H₂, OH, C(s), H₂O(l)의 15 개이다.

벽면과 연소가스의 복사열전달 계산을 위해 공간차분된 격자들을 방위각에 대해 차분하여 복사 전달방정식을 푸는 구분좌법(discrete ordinates method)을 사용했다. 흡수계수의 계산은 WSGGM (Weighted Sum of Gray Gas Model)을 사용하였으며 산란은 무시하였다. 벽면은 diffuse/opaque 가정을 사용하였다. 복사열전달 계산을 통해 얻은 복사열을 에너지 방정식에 포함시켰다.

NO_x 는 fuel NO 와 thermal NO 만을 고려하였으며 다른 모든 계산이 끝난 다음 후처리 과정을 통하여 계산하였다. Thermal NO_x 의 생성은 extended Zeldovich mechanism 을 사용하였으며 [N]에 대한 준 정상상태(quasi-steady) 가정과 [O]의 partial equilibrium 가정을 사용하여 계산하였다. Fuel NO_x 계산에서 중간생성물은 HCN 만을 고려하여 HCN 이 O₂ 와 반응하여 NO 가 생성되는 반응과 NO 와 반응하여 N₂ 가 생성되는 두 가지 반응을 풀었다. 난류의 영향은 normalized temperature 를 사용한 2-variable β -PDF 를 사용하여 계산하였다.

공간차분은 2 차 upwind 기법을 사용하였고 압력-속도 보정은 SIMPLEC 를 사용하였다. 이 방정식들의 계산은 상용 프로그램인 Fluent v5.를 사용하였다.

3 단으로 나뉘어 공급되는 연소용 공기 전체의 유량은 운전조건으로부터 결정되며 각 단의 유량과 선회속도는 windbox 와 버너의 수치해석 결과를 바탕으로 결정하였다. 버너의 선회속도의 방향은 가운데 버너는 화로에서 볼 때 시계 방향이며 위와 아래의 버너는 반대 방향이다. 벽의 열전달 경계조건은 등온조건을 사용하였으며 복사열전달 흡수율은 상수로 주었다.

4. FEGT 측정

FEGT 의 측정은 길이가 2m 인 R-type 열전대를 사용하였다. 열전대의 구조를 그림 4.에 나타내었다. 화로 내부의 가스 온도는 물과 증기가 흐르는

수관의 온도와 상당한 차이가 있다. 이와 같은 온도차이에 의한 복사열전달 때문에 열전대로 측정 한 온도는 실제 가스온도와 차이가 있다. 이런 차이를 줄이기 위해 열전대의 바깥에 원형 관으로 차폐막(radiation shield)을 설치하여 열전대의 접점과 수관 벽 사이의 복사를 막았다. 차폐막을 여러 겹으로 설치하여야 이 오차를 완전히 줄일 수 있지만 측정하고자 하는 온도 범위에서는 그 차이가 그리 크지 않은 것으로 알려져 있고, 검사구멍 직경의 한계로 한 겹만 설치하였다.

차폐막 내부에서 유동이 정체되면 열전대 접점에서의 온도는 실제 온도와 차이가 있게 되므로 유동의 정체를 막기 위해 그림 4.와 같이 흡입관(suction pipe)을 설치하여 가스가 보일러 밖으로 빠져나갈 수 있도록 하였다. 화로의 압력이 대기압보다 낮거나 같을 경우에는 흡입관에 압축공기를 이용한 아스피레이터(aspirator)를 설치할 수 있도록 하였다.

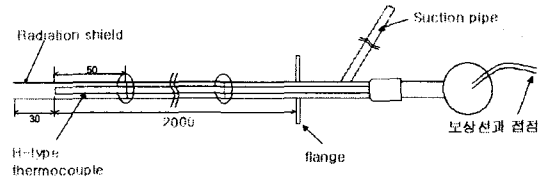


그림 4. FEGT 측정용 열전대

온도 측정은 화로 출구 전단에 있는 검사구멍에서 측정하였으며 검사구멍에는 압축공기를 공급하여 고온의 가스가 외부로 방출되는 것을 막아 주었다. 측정 대상은 청주지역난방, 울산석유화학지원공단(UPSC), Sithe 이천, 삼양사, 현대정유에 있는 보일러들이다.

5. 결과

5.1 화로 내부의 연소 특성

그림 5-7.에 260ton/hr 용량 보일러 화로 내부의 온도 분포, 벽에서의 열유속, 각 버너에서 공급되는 유동의 path-line, 버너 중앙을 지나는 수직 단면에서의 화학종들의 질량분율을 나타내었다.

버너 출구에 재순환 영역이 있는데 이 부분이 연료 과잉 영역으로 온도가 낮고 CO 가 많이 나타난다. 그 후류에 미연분이 연소 되는 고온 영역이 형성되는 다단 연소 현상을 보여 준다. 그림 5-7 에서 나타낸 260ton/hr 보일러에서 화염은 화로의 위쪽으로 향하고 있으며, 가운데 행의 두 버너의 화염은 화로 중앙으로 모이는 형태이며 위와 아래쪽 버너의 화염은 벽 쪽으로 갈라지는 형태를

보인다. 가장 고온의 영역은 가운데 버너들에 의해 화로의 위쪽으로 향하는 화염이 형성되는 부분이며 여기서 많은 양의 thermal NOx 가 발생될 것을 예측할 수 있다. 열유속은 측벽에서 상당히 높은 값을 나타내고 있는 반면 버너 쪽과 위쪽의 벽은 상대적으로 낮은 분포를 나타낸다.

이와 같은 화염의 형태와 벽면의 열유속 분포는 화로의 폭과 버너의 개수 버너들의 위치와 간격들이 보일러 용량에 따라 다르기 때문에 각 보일러들에서 다르게 나타난다. 화로 형상, 버너의 위치, 선화 속도와 방향, 공기의 유량비 등을 적절히 조절하여 최적의 조건을 찾을 수 있을 것이다.

계산 결과 보일러 화로에서의 열전달은 용량에 따라 다소 차이는 있지만 복사열전달이 90% 정도의 비율을 차지하였다.

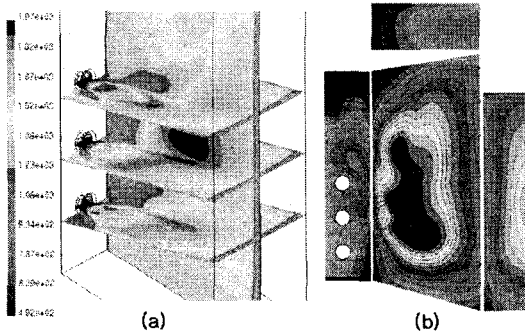


그림 5. (a)온도분포, K (b) heat-flux

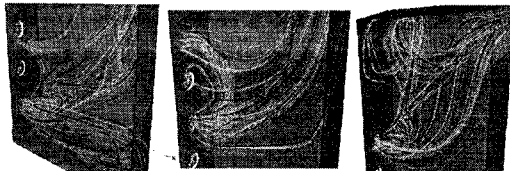


그림 6. Path-Line

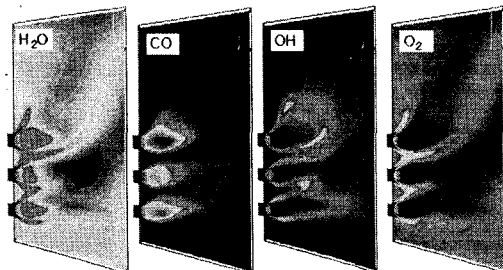


그림 7. Species Concentration

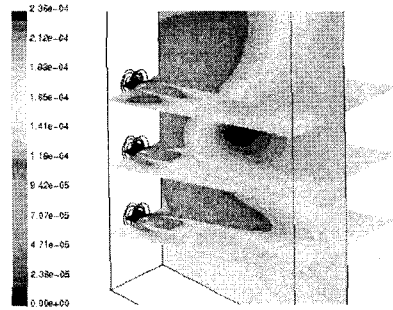


그림 8. NOx mass fraction

5.2 NOx

그림 8.은 260ton/hr 보일러의 NO 분포를 나타낸 그림이다. 계산결과 각 보일러의 NOx 발생량은 150-200ppm 범위의 값을 얻을 수 있었으며 이 값들은 실 플랜트에서의 측정 결과보다 조금 낮은 값이다. 연료 속 질소 성분의 75% 정도가 fuel NOx 로 생성되며, 전체 NOx 중 25% 정도가 thermal NOx 인 결과를 얻을 수 있었다.

5.3 FEGT

그림 9.에 FEGT 측정 결과와 계산결과를 비교하여 나타내었다. 실 플랜트 측정의 한계로 인하여 화로 출구 전체의 온도 분포를 측정할 수 없었으며 측정지점의 온도를 계산을 통해 얻은 화로 출구의 평균 온도와 비교하여 나타내었다. 각 보일러의 운전 조건은 측정할 당시에 보일러가 운전되는 조건이므로 보일러마다 다르다.

삼양사와 현대정유의 보일러는 HT-type 이며 나머지는 HS-type 보일러이다. 전체적으로 상당히 잘 일치하고 있으며 HS-type 이 더 잘 일치한다.

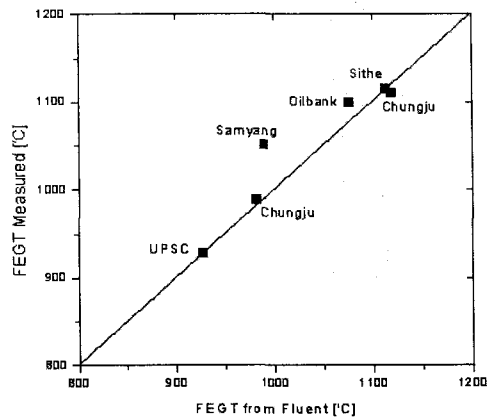


그림 9. FEGT 계산값과 측정값의 비교

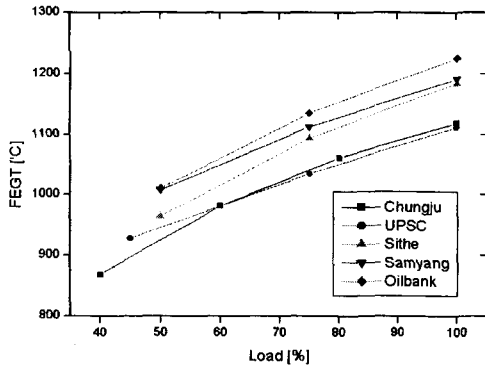


그림 10. 계산을 통한 FEGT 특성곡선

HS type 이 HT type 보다 오차가 작은 것은 HS type 이 화로의 형상이 간단하여 복사열전달을 계산할 때 보다 정확한 결과를 얻을 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

그림 10.은 전산해석을 통해 도출한 각 보일러들의 FEGT 특성곡선이다. 부하에 따른 기울기는 유사한 경향을 나타내지만 FEGT 값은 각각의 보일러마다 다른 특성을 나타낸다. 이는 각 화로의 형상과 요구되는 증기의 압력, 공급공기의 온도 등이 다르기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서 산업용/열병합 보일러 화로에서의 연소와 열전달, NOx 생성, FEGT 특성곡선을 전산유체를 이용하여 계산하였다. 실 플랜트에서 온도 측정을 위해 열전대 제작하여 화로 출구의 온도를 측정하여 계산결과를 검증하였으며 측정지점의 값으로 대표한 FEGT 와 잘 일치하는 계산결과를 얻을 수 있었다..

본 연구를 통하여 여러 개의 버너가 장착된 대형 보일러 화로 내부에서의 화염구조와 벽에서의 열유속 분포, NOx 생성특성을 파악하였다. 그리고 각 보일러들의 FEGT 특성곡선을 도출하였다

대형 보일러의 개발이나 설계 향상에 있어 많은 방안들을 모두 실험을 통해 확인하기에는 실험장치와 예산의 규모가 너무 크기 때문에 전산유체의 활용은 필수적이다. 이 때 해석결과의 신뢰성이 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 FEGT 측정을 통하여 계산결과의 신뢰성을 검증하였는데, 한 측정지점의 값으로 출구 전체의 온도를 대표한다는 문제와 지금까지 측정 결과들이 충분히 많지 않다는 한계가 있다. 전산 해석에 있어서는 연료로 사용되는 증유의 복

잡한 연소 반응에 대한 충분한 이해 부족으로 화학평형 가정을 사용할 수 밖에 없었으며 등은 벽면 가정의 사용 및 벽면 복사 흡수율의 부정확함 등의 한계를 갖고 있다.

이러한 여러 가지 한계에도 불구하고 여러 개의 보일러에서 측정된 값과 계산한 값들이 작은 오차 범위 내에서 서로 일치하고 있고, 계산을 통해 얻은 FEGT 값을 이용해 각 보일러의 운전 특성을 분석한 결과들이 실제 운전 상황을 상당히 잘 나타내 주고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해서 측정과 계산 모두에서 정량적으로 정확한 계산 오차 범위를 추정해 낼 수는 없지만, 전산 유체 해석의 결과를 효율적 보일러 설계를 위한 기준으로 삼을 수 있는 근거를 획득하였다고 할 수 있다. 또한 계산 결과들을 바탕으로 각각의 보일러에서 조금씩 다르게 나타나고 있는 운전 특성들의 원인을 규명할 수 있었으며 기존의 FEGT 계산방법의 한계 지점을 파악할 수 있었다.

앞으로 계산결과와 정량적 정확성을 높이기 위해 FEGT 의 보다 정밀한 측정을 위한 방법을 고안하여 계속된 측정을 통해 데이터를 축적할 것이며, 실 플랜트 측정의 한계를 극복하기 위해 저 NOx 버너의 성능시험 설비를 구축하여 필요한 데이터를 얻도록 할 것이다. 정량적 정확도를 높이기 위한 연구와 동시에 설계 변수들의 정성적 특성 파악을 위한 연구를 통해 보일러 화로와 저 NOx 버너의 효율적 설계 방안을 마련할 것이다.

참고문헌

- (1) B & W, "Steam, its generation and use 40th edition"
- (2) Fluent user's guide vol. 1-4, Fluent, Inc
- (3) T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model", transactions of the ASME, vol.104, pp602, 1982
- (4) A. Coppalle, P. Vervisch, "The Total Emissivities of High-Temperature Flames", combustion and flame 49:101-108, 1983
- (5) S. Sierila, M. Talvitie, A. Saario, A. Oksanen, "Renewal of a Multi-Burner Furnace-Modeling of Combustion and Emissions Using Low-NOx Burners", Technologies and combustion for a clean environment 6th conference, vol. I, pp171, 2001
- (6) A. M. Gordridge, A. W. Read, "Combustion and Heat Transfer in Large Boiler Furnaces", Prog.Energy Combust.Sci..Vol.2, pp83, 1976